NCR ビルディング（現・日本財団ビル）のダブルスキンシステムの特徴と実測による温熱環境性能評価

CHARACTERISTICS OF NCR BUILDING'S DOUBLE-SKIN FACADE SYSTEM AND EVALUATION OF ITS THERMAL PERFORMANCE BY MEASUREMENTS

川島範久 — * 1 早坂 駿 — * 2
鶴見隆太 — * 3 浅輪貴史 — * 4
安田幸一 — * 5

Norihisa KAWASHIMA — * 1 Shun HAYASAKA — * 2
Ryuta TSURUMI — * 3 Takashi ASAWA — * 4
Koichi YASUDA — * 5

キーワード：
NCR ビルディング, ダブルスキンシステム, エアフローウィンドウ, 温熱環境性能評価, 実測

Keywords:
NCR building, Double-skin facade system, Air flow window, Thermal performance evaluation, Measurement

This report is on the double-skin facade system of NCR building, which was the first to be installed in Japan in 1962. This report also includes the result of the environmental measurements of it in 2015, following over 50 years after initial construction. The original drawings showed that the facade system was exquisitely designed to integrate the performance of thermal control, fire prevention, rainwater drainage system and its maintenance. The result of the measurement showed that the thermal performance was high as at that time and the performance at the time of its original completion had been maintained even now.

1. はじめに

近年、ビルの窓周りにおける省エネルギーおよび快適な温熱環境・光環境の実現のため、ダブルスキンファサード (DSF) やエアフローウィンドウ (AFW) などの二層のスキンで構成される高性能窓システム^{1) 注1)}が注目を浴びている。本報告における「ダブルスキンシステム」という言葉は、このような二重のスキンによるシステムの総称として用いる。

このようなダブルスキンシステムが日本で初めて導入されたのは、1962年に竣工した吉村順三設計事務所（担当：奥村昭雄）によるNCRビルディング（以下、NCRビル）と言われている²⁾（図1、表1）。その後1995年まで、日本においてオフィスの執務空間のファサードにダブルスキンシステムが採用された事例は1件（1982年竣工の大林技術研究所）のみであり、1996年以降になって多くの事例で採用されるようになった（図2）。現在のように、アルミサッシの既製品やLow-Eペアガラスをはじめとする高性能ガラスが無く、空調機がまだ高価だった時代に、「生き物のように、建築の外皮に外界の変動の影響を縮小する能力を持たせる」ことを意図²⁾して計画されたこのダブルスキンシステムにおける空気の流れや断熱の仕組みは、当時として画期的であったとともに、現代においても有用な知見を与えてくれるものである。

このNCRビルは、老朽化に伴い、2001年に松田平田設計により「日本財団ビル」として改修された。この改修工事により一部の内装および設備機器が更新されたが、このダブルスキンシステムは当時の

図1 NCRビルの外観（東側）

表1 NCRビルの概要

名称	NCRビルディング(現 日本財団ビル) [※]
所在地	東京都港区赤坂溜池
主要用途	事務所(自社ビル)
建築	吉村順三設計事務所(担当 奥村昭雄)
設計	構造 株式会社 竹中工務店
監理	空調衛生 畔柳健太郎
電気	大滝設備事務所
建築	株式会社 竹中工務店
施工	空調衛生 三機工業株式会社
電気	関東電気工事株式会社
規模	敷地: 2,247.9 m ² 建築: 1,591.5 m ²
構造	延床: 18,329.4 m ² 基準階: 1,579.5 m ²
構造/階数	SRC造/地下4階, 地上8階, 塔屋3階
竣工	1962年
改修	2001年/松田平田設計

図註 参考文献 2), 3) をもとに作成。 ※ 2000年に所有が日本財団となった。

	1900	1930	1940	1950	1960	1970	1980	1990	2000	2010	～	year
ダブルスキンシステム事例					◎1962 NCRビル		●1982 大林技術研究所: DSF					※ 竣工年
サッシ					□1913 スチールサッシの製作 (奥村製作所)		□1950 押出成形アルミサッシの製作 (三機工業)					
ガラス					■1909 普通板ガラス ^{※1)} の生産開始 (AGC)		■1985 Low-Eペアガラスの発売 ^{※4)} 開始 (AGC)					
					■1935 網入ガラス ^{※2)} の生産開始 (AGC)		■1986 高性能熱線反射ガラスの生産開始 (AGC)					
					■1938 強化ガラスの生産開始 (AGC)		■1988 Low-Eペアガラスの自国生産 ^{※5)} 開始 (AGC)					
					■1954 ペアガラス ^{※3)} の生産開始 (AGC)							
					■1956 熱線吸収ガラスの生産開始 (NSG)							
					AGC: AGC旭硝子 NSG: 日本板硝子		■1965 フロート板ガラスの生産開始 (NSG)					
							■1966 熱線反射ガラスの生産開始 (NSG)					

図註 ダブルスキンシステム事例は、新建築 1963年1月号～2015年12月号を調査し、代表的な事例を掲載。サッシ・ガラスの歴史については、参考文献 4)～11) をもとに作成。 ※1 ペルギー式手吹円筒法による ※2 亀甲目網入りガラスを指す ※3 普通複層ガラスを指す ※4 米国から輸入したLow-Eガラスを使用したLow-Eペアガラス「サーモエースペア」を発売 ※5 Low-Eガラスも国内製造した製品を生産

図2 国内の主要なダブルスキンシステム採用事例と国内のガラス・サッシ開発年表

本稿は2016年度日本建築学会大会学術講演会で発表した論文を加筆・修正したものである。

¹⁾ 東京工業大学環境・社会理工学院建築学系 助教・博士（工学）
（〒152-8550 東京都目黒区大岡山2-12-1）
²⁾ 元・東京工業大学大学院理工学研究科 建築学専攻・修士（工学）
³⁾ ㈱日建設計総合研究所 修士（工学）/ 東京工業大学環境・社会理工学院建築学系 博士課程
⁴⁾ 東京工業大学環境・社会理工学院建築学系 准教授・博士（工学）
⁵⁾ 東京工業大学環境・社会理工学院建築学系 教授・博士（学術）

¹⁾ Assist. Prof., Dept. of Architecture and Building Engineering, School of Environment and Society, Tokyo Institute of Technology, Dr. Eng.
²⁾ Former Student, Dept. of Architecture, Tokyo Institute of Technology, M. Eng.
³⁾ NIKKEN SEKKEI Research Institute, M. Eng. / Doctor Course Student, Dept. of Architecture, Tokyo Institute of Technology
⁴⁾ Assoc. Prof., Dept. of Architecture, Tokyo Institute of Technology, Dr. Eng.
⁵⁾ Prof., Dept. of Architecture, Tokyo Institute of Technology, Ph.D.

まま維持された。筆者らは、このNCRビルの1962年竣工時の原図および2001年改修工事時の図面を入手し、さらに2015年に現地での窓周りの採寸と機構の調査、および温熱環境性能調査を行う機会を得た。本報は、これらの調査の成果を報告すると同時に、近年の窓システムの温熱環境性能と比較を行い、当時の技術で為し得た熱性能を明らかにするものである。

このNCRビルのダブルスキンスシステムの熱性能の実測および解析は、竣工直後に設計担当者の奥村昭雄の厚意のもと、建築研究所の野村豪により行われ、その成果が報告されている¹²⁾。実測としては、冬期の暖房時における東壁面のキャビティ内の空気温度、流入空気の温度と速度、屋上階排気ダクトにおける排出された総風量の測定がなされた。また、キャビティ内の温度分布を推定する計算式が提案され、実測値との近似を確認した上で、最大負荷時（外気温0℃、室内20℃）の貫流熱量が試算され、1重ガラスと2重ガラスより、それぞれ86%と66%減少するという試算が報告された。

これに対して本報告は、南東面と北東面の2面に対して、冬期のみならず夏期および中間期も実測を行った点、実測値に基づく熱貫流率の推定に、近年に郡らによって提案された窓システムの熱性能式¹³⁾を用いている点、そして、現代の高性能窓システムとの性能比較を行うことで、その性能値を相対的に把握し直している点で、新たな知見を加えていると言える。

また、近年のダブルスキンスシステムの熱性能を実測によって評価する既往研究は、武政らの研究¹⁴⁾や菊田らの研究¹⁵⁾をはじめ多くある。一方、本報告は竣工後50年以上が経過したビルに対する実測調査であり、維持管理によってはダブルスキンスシステムの性能が維持されうることを示す重要な知見にもなる。

2. NCRビルのダブルスキンスシステムの計画的特徴

本章では、表2の原図と参考文献、および2015年実施の窓周り寸法と機構の調査をもとに図面を作成し、その特徴を考察する。

敷地は三角形の敷地であり、道路三面に囲われた独立した敷地で全ての立面が見えたため、全面が1つの印象を与えることのできる外装計画が意図された²⁾。北東・南東・北西^{注2)}に主な辺を持つ5角形の地上8階建ての建物^{注3)}で、各面に異なる時刻に日射が当たり、建物の負荷が移動し、内部の温熱環境が変動する(図3)。この外界の変動の影響を小さくするため、換気のために捨てることになる空調された空気を、屋根までつながる二重のサッシ間のキャビティ空間に通して、塔屋に設置されたファンで排気するダブルスキンスシステムが3階以上の階で、事務室の全方位に採用された^{注4)}(図4, 5)。これにより冬の窓面の熱放射環境を快適なものに保てるだけでなく、外側のガラスに熱線吸収ガラスを採用することで、日射を受ける面に浮力で排気を集中させることで、夏の日射による影響を

表2 主に参照したNCRビル設計図 原図リスト

NCRビルディング(ナショナル金銭登録機本社ビル) 原図 ^{※1)} /設計 吉村順三設計事務所/作成 1960.11~1962.8					
建築図面					
No.1 配置図	1/100	Mar. 1st. 1961	No.7 ガラス扉体両引窓	-	Dec 28th. 1961
No.2 3~8階平面図	1/100	Mar. 1st. 1961	No.8 手摺姿図	-	Dec 28th. 1961
No.3 矩形図(1)~(4)	1/20	Mar. 1st. 1961	No.9 手摺(3-8F)	-	Dec 28th. 1961
No.4 展開図5階(1)~(4)	1/50	Mar. 1st. 1961	No.10 手摺原寸図	1/1	Dec 28th. 1961
その他					
サッシメーカー図面(不二サッシ工業株式会社)					
No.5 標準サッシ、サッシ下段詳細図	-	Dec 28th. 1961	No.11(仮称)新・日本財団ビル改修工事図面	原図 ^{※2)}	
No.6 標準サッシ	-	Dec 28th. 1961	設計 松田平田設計 / 作成 2001年		

図註 ※1 日本財団より受領。 ※2 日本財団の許可のもと株式会社松田平田設計より受領

図3 NCRビルの基準階平面図

図註 原図 No.1, No.2 をもとに作成

図註 原図 No.3 をもとに作成

図註 参考文献2), 3) および原図 No.11 をもとに作成

図4 NCRビルの断面アイソメ図

図5 空気の流れダイアグラム(現状)

図6 NCRビルの窓廻り断面詳細図

図註 原図 No.3, No.5 No.8, No.9 をもとに作成

縮小することが意図された¹⁶⁾。さらに、外側スキンの先には日射制御装置としての庇を兼ねたメンテナンスバルコニーを設け、その先に黒いアルミ押出材（染色アルマイト）で構成された手摺を設けることで、立面全体に水平の帯を形成し、全ての立面が統一された印象を与えている（図6）。

外側サッシはアルミ押出材でガラスはブルーベンガラス（熱線吸収ガラス）が入っており、内側サッシはボンテ鋼板で透明ガラスが入っている。建設当時はアルミサッシの既製品がなかったため、設計担当者の奥村昭雄がアメリカのアルミ加工に関する博士論文を調べて作図し、不二サッシと共同で製作した。内側と外側の両方に無目が設けられ、3～7階における室内側の無目部にはエアフローの流入口としてのスリットが設けられている（図8）。

室内外ともに、無目の上部ははめ殺し窓^{注5)}で、下部は一部開閉可能となっている。この下部の開閉機構は、外側は突き出し窓、内側は引き戸兼浮き出し窓となっており、自然通風^{注6)}とメンテナンスを可能にしている^{注7)}（図7, 8）。室内側の取手は、浮き出し窓の取手になるとともに、引き戸になる際にすべり出さないようにロックする役割も果たす（図9）。また、当時は現在普及している下車式が低級品の扱いであった背景⁴⁾から、上吊式片引き戸の形式になっている。この開閉機構にはその後普及するブチルゴムなど単体で気密性を向上させる部材は用いられていないが、サッシ同士がL型になっており、噛み合わされることで気密性が高められている（図10）。キャビティ内の中段（FL+720：無目レベル）と天井レベル（FL+3,060）には鋼板のグリルがある。中段グリルは開閉可能で、メンテナンス時は室内側の下部引き戸を開けてキャビティ内に入り、中段グリルを開放して、隣のグリル上に立つことで、ダブルスキン内部を上までメンテナンスすることが可能となる。また、天井グリルの上部にはボンテ鋼板の防火ダンパーが設けられ、温度ヒューズによって火災時には階の防火区画ができるようになっている（図8）。

柱スパンは5,500mmとなっており、サッシはスパンを4分割した1,375mmピッチとなっている。柱スパンごとにキャビティ空間は区画されており、その区画壁に雨樋が組み込まれている（図9, 10）。屋根面と各階のメンテナンスバルコニー部分から集められた雨水は、このキャビティ内の雨樋を通り、2階天井内で建物内部に引き込まれ、2階以下の柱の仕上げ内に収めることによって、雨樋を表に現すことなく地下まで導かれている。しかし、2階天井内の堅樋と横樋の接合部は、外部から点検可能となっている（図6）。

以上の機構の組み合わせによって、窓際の熱放射環境の改善、熱負荷の削減、日射制御、自然通風、防火区画、雨水処理、メンテナンスといった様々な機能をひとつの窓システムに精巧に統合し、周

図7 下段の開閉機構

※全て筆者撮影（2015年）

図8 NCRビルの内側開閉機構詳細図

図註 原図No.3, No.5, No.7, No.9をもとに作成

図9 NCRビルの室内側立面図 兼 窓廻り平面詳細図

図註 原図No.3, No.4, No.5をもとに作成

図10 NCRビルの窓廻り収まり詳細図

図註 原図No.5, No.6をもとに作成

辺の環境に合った立面を形成することに成功している。

3. NCR ビルのダブルスキンスシステムの温熱環境性能評価

NCR ビルのダブルスキンスシステムは、3～8階の6層分のキャビティ空間がすべて連続しており塔屋のファンでまとめて引き上げて排気されている点や、ブラインドがキャビティ内ではなく室内側に設置されている点等、近年の一般的なAFW¹⁾と異なる^{注8)}点が見受けられるが、空調された室内空気をキャビティ内に導入し、排気ファンを用いて下層から上層に向かって強制的に上昇気流を作ることによって排熱しているため、近年の定義におけるAFWに該当するとして論を進める。本章では、NCR ビルのAFWの温熱環境性能に特化し、図面をもとにした定量的評価と、環境実測調査に基づく分析・考察を行う。環境実測調査の概要を表3にまとめた。具体的な測定場所については、図3と図4に記載した^{注9)}。なお、NCR ビルの熱源機器・空調方式は、竣工当初は各階に空調機、地下に冷凍機・ボイラーを配置した中央熱源方式であったが、2001年の改修時に各階に外気負荷を処理する外調機と室内負荷を処理するビル用マルチエアコンが配置され、外調機用の熱源機器として屋上に吸収式冷温水機が設置されるシステムに変更された^{注10)}。

3.1 熱貫流率 (U 値)・日射熱取得率 (η 値)

AFWの熱性能を評価するために、キャビティ内に空気の流れる場合の熱貫流率 (U 値)・日射熱取得率 (η 値)を算出した。代表値として6階の熱貫流率 U_{AFW} [W/(m²・K)]と日射熱取得率 η_{AFW} [-]を示す。AFW内の空気温度を均一とみなすと、多層連結型のAFWの熱貫流率、日射熱取得率は以下の式(1)、(2)を用いて得られる¹³⁾。なお、AFW内の空気温度に各階で大きな差がないことは、3.3節の結果で述べる。

$$U_{AFW} = U + \Delta U r \quad \text{—— (1)}$$

$$\eta_{AFW} = \eta + \Delta \eta r \quad \text{—— (2)}$$

ここで U : 非通気時の熱貫流率 [W/(m²・K)], η : 非通気時の日射熱取得率 [-], Δ : 十分大きい風量をキャビティ内に通気させた際の性能の変化量である。また、 r は通気効果率 [-]で次式(3)により得られる。

$$r = c_p \rho V / (K_c + c_p \rho V) \quad \text{—— (3)}$$

ここで c_p : 空気定圧比熱 [kJ/(kg・K)], ρ : 空気密度 [kg/m³], K_c : キャビティ内対流熱取得係数 [W/(m²・K)]と、 V はガラス面積当たりの自然換気量 [L/(m²・s)]であり、AFWの単位幅あたりの自然換気量を V_{in} [CMH/m], 階高 H [m], 総層数を N [-]として以下の式(4)で得られる。

$$V = V_{in} / (3.6 H \cdot N) \quad \text{—— (4)}$$

表4に示した実測したキャビティ内風速(詳細は3.3節で後述)をもとに算出したU値を図11、η値を図12に示す。比較のため、他の代表的な窓ガラスの値も示す。NCR ビルの性能は、風速が強かった冬期南東面でU値が1.84 [W/(m²・K)]、η値が0.44であった。これは、アルゴンを封入したLow-Eペアガラスよりはやや劣るが、普通ガラスや普通複層ガラスより優れていた。現代の高性能な複層ガラスには及ばないものの、Low-Eガラスや熱線反射ガラスが発売されていない当時としては高性能な窓システムであったといえる。

3.2 庇(手摺付バルコニー)による日射遮蔽効果

冷房負荷を考える場合、ガラスから侵入する日射が重要な要素

表3 実測概要

	夏期	秋期	冬期
測定期間	2015/7/27 - 8/26	2015/10/15 - 10/30	2015/12/4 - 2016/1/7
代表日	8/6	10/22	12/9
測定階	北東: 3.6, 8階 南東: 3.6, 8階	北東: 3.6, 8階 南東: 3.4, 5.6, 8階	北東: 3.6, 8階 南東: 3.4, 5.6, 8階
測定箇所	キャビティ内: 気温(熱電対)、風速(Glimaster6542-21/kanomax)		
測定項目	外・内ガラス: 表面温度(熱電対)		
(測定階各階にて)	インテリア・ベリメーターゾーン: 温湿度(RTR-5030/T&D)

図11 熱貫流率 (U 値) 図註 ガラス厚は全て6mmとして計算 ※遮熱タイプ

図12 日射熱取得率 (η 値) 図註 ガラス厚は全て6mmとして計算 ※遮熱タイプ

表4 熱貫流率・日射熱取得率の算定に用いた風速値

代表日	方位	風速 [m/s]
夏期 (8/6)	南東面	0.13
	北東面	0.07
中間期 (10/22)	南東面	0.28
	北東面	0.18
冬期 (12/9)	南東面	0.42
	北東面	0.15

図13 庇(手摺付バルコニー)の日射遮蔽効果 (夏期・南東面) 図註 代表日 9:00～17:00の平均値として算出

になる。NCR ビルの外側スキンの先には庇として機能する手摺付バルコニーが備えられている。太陽位置との幾何学的関係から、この日射量の削減効果を算出した。太陽位置東面や西面の日射量が厳しい冷房設計用気象データであるJc-t基準¹⁷⁾の東京のデータを用い、ガラス面の日射部分の面積を以下の式(5)、(6)により算出した。

$$y = (H - w \cdot \tan \phi) - z \quad \text{—— (5)}$$

$$z = h - w \cdot \tan \phi \quad \text{—— (6)}$$

ここで y : ガラス面の日照部分の高さ [m], H : 階高 3.06 [m], w : ひさし長さ 0.7 [m], ϕ : 太陽高度角 [rad], z : ガラス面における手すり部分の影の高さ [m], h : 手すりの高さ 0.7 [m]とした。夏期^{注11)}の南東面の直達日射は、比較の日射が強い条件であるJc-t基準の気象データを用いた場合、庇(手摺付バルコニー)により一日全体で35%削減されていた(図13)。

3.3 温熱環境の実測結果

夏期の南東面では、外ガラス・内ガラスの表面温度差が、日射ピーク時(午前8時)に約7℃、日陰に入ると約3℃となっていた。これは、外ガラスに熱線吸収ガラスを採用している効果大きい。キャビティ内の温度は、内ガラスの表面温度とほとんど等しく、北東面でも同様の傾向が得られた(図14)。中間期の南東面では、外ガラスの表面温度が内ガラスより、日射ピーク時(午前10時半)で約6℃高かったが、日陰に入ると逆転し約3℃、内ガラスの方が高

図 14 夏期代表日 8/6 窓廻り温度 (左: 6 階南東面 右: 6 階北東面)

図 15 中間期代表日 10/22 窓廻り温度 (左: 6 階南東面 右: 6 階北東面)

図 16 冬期代表日 12/9 窓廻り温度 (左: 6 階南東面 右: 6 階北東面)

図 17 夏期代表日 8/6 キャビティ内温度 (左: 6 階南東面 右: 6 階北東面)

図 18 中間期代表日 10/22 キャビティ内温度 (左: 6 階南東面 右: 6 階北東面)

図 19 冬期代表日 12/9 のキャビティ内温度 (左: 6 階南東面 右: 6 階北東面)

かった。北東面では日射が当たらず、一日を通して安定して内ガラスの方が外ガラスより表面温度が約 2 °C 高かった (図 15)。冬期の南東面では、外ガラスの表面温度が、内ガラスより、日射ピーク時 (午前 11 時) で約 6 °C 高かったが、日陰に入ると秋期と同様に逆転し、約 5 °C、内ガラスの方が高かった。北東面では、日射が当たらず、一日を通して安定して、内ガラスの方が外ガラスより表面温度が約 5 °C 高かった (図 16)。いずれの季節でも、外部の変動の影響が縮小されて室内に伝わっていた。

キャビティ内の風速はいずれの季節でも、直達日射が当たる時間帯にピークを迎えていた (図 17, 18, 19)。なお、鉛直面日射量は、直線距離で約 2.6 km に位置する気象観測所の全天日射量を用いて Erbs モデルにより算出した¹⁸⁾。特に、冬期の南東面で風速が大きく、0.7 m/s を越えていた (図 19)。これは、冬期の南東鉛直面の日射量が大きく、強い浮力が生まれたためと考えられる。風速が大きくなることは、AFW の熱性能が上がることを意味する。従って、直達日射が最も強くなる時間帯に、AFW の熱性能が最も高くなっ

図 20 夏期代表日 8/6 のキャビティ内鉛直温度分布 (左: 南東面 右: 北東面)

図 21 中間期代表日 10/22 のキャビティ内鉛直温度分布 (左: 南東面 右: 北東面)

図 22 冬期代表日 12/9 のキャビティ内鉛直温度分布 (左: 南東面 右: 北東面)

ていたと言える。なお、今回実測された風速値は、竣工直後に行われた実測値と概ね一致する¹²⁾。

キャビティ内の気温の鉛直温度分布を図 20 ~ 図 22 に示す。キャビティ内温度が高くなる夏期においても、大きな鉛直温度勾配は得られておらず、各階での AFW 内への室内空気を取り込みが効果的に行われていることを示している。この結果も、竣工直後の冬期にキャビティ内気温を実測した結果とも概ね符合する¹²⁾。

3.4 熱負荷削減効果

AFW の効果を確認するために、実測したガラスの表面温度をもとに、各季節の代表日オフィスアワー (9:00 ~ 17:00) の、室内への日射の負荷 q_s [W/m²]、室内への熱伝達による負荷 q_t [W/m²]、ガラス単位面積当たりのキャビティ内の換気による除去熱量 q_v [W/m²] を式 (7), (8), (9), (10) を用いて算出した。その算定式を以下に示す。

$$q_s = \tau_{12} (J_d \cdot SG + J_s) \quad (7)$$

$$q_t = \alpha (T_{\text{glass in}} - T_{\text{air interior}}) \quad (8)$$

$$q_v = v d c_p \rho (T_{\text{air cavity}} - T_{\text{air interior}}) / H \quad (9)$$

ただし、

$$\tau_{12} = \tau_1 \tau_2 / (1 - \rho_1 \rho_2) \quad (10)$$

ここで、 τ_{12} : ガラス総合透過率 [-], SG : ガラス面日照面積率 [-]¹³⁾, J_d : 鉛直面直達日射量 [W/m²], J_s : 鉛直面天空日射量 [W/m²], ρ : 反射率 [-], α : 室内側総合熱伝達率 [W/(m² · K)], $T_{\text{glass in}}$: 内ガラスのキャビティ内表面温度 [°C], $T_{\text{air interior}}$: 室内インテリア温度 [°C], v : キャビティ内風速 [m/s], d : キャビティ幅 0.4 [m], c_p : 空気定圧比熱 [J/(kg · K)], ρ : 空気密度 [kg/m³], $T_{\text{air cavity}}$: キャビティ内気温 [°C], H : 階高 3.06 [m] とした。なお、添字の 1 は外ガラス, 2 は内ガラスを意味する。鉛直面日射量 J_d は図 17 ~ 19 の値を用いた。夏期と中間期は室外から室内へ流入する熱量を負荷と考え、冬期はその反対とした¹⁴⁾。

結果を図 23 ~ 25 に示す。いずれの時期も、窓ガラスから室内への熱伝達による熱負荷が小さく、AFW の効果が確認できる。夏期と中間期の直達日射が当たっている時間帯は、日射による負荷が熱伝達による負荷を卓越していた。また、中間期の南東面で、日射があたってガラス窓からの熱伝達による負荷が増加している一方、換

図 23 夏期代表日 8/6 の熱負荷 (左:6 階南東面 右:6 階北東面)

図 24 中間期代表日 10/22 の熱負荷 (左:6 階南東面 右:6 階北東面)

図 25 冬期代表日 12/9 の熱負荷 (左:6 階南東面 右:6 階北東面)

気による熱除去量も増加しており、日射のピーク時（午前 11 時）において後者は前者の 2 倍以上、上回っていた。冬期では、特に北東面で内ガラスからの熱伝達による負荷は一日を通して発生しているが、キャビティ内の換気による熱負荷の削減が上回っていた。キャビティ内の熱除去（冬期は冷熱除去）は夏期の南東面・北東面と冬期の北東面で一日にわたり効果的に機能していた。一方で、冬期の南東面の日射が当たっている時間帯では日射による熱を排気してしまっている。この排気を空調機にリターンさせるシステムにすれば、有効利用することが可能であると考えられる。

4. おわりに

本報告では、日本で初めてダブルスキンスystemが導入された 1962 年竣工の NCR ビルにおける窓システムの計画的特徴を示すとともに、竣工後 50 年以上が経過した現在の温熱環境性能の実測調査結果を報告した。

NCR ビルの原因と現地調査をもとに図面を作成して分析した結果、NCR ビルのダブルスキンスystemは、当時の技術を駆使し、窓際の温熱環境制御だけでなく、防火・雨水処理・メンテナンスといった様々な機能をひとつの窓システムに精巧に統合し、周辺の環境に合った立面を形成することに成功していることを示した。

また、2001 年に改修工事が行われ、現在オフィスビルとして運用されている状況下で、温熱環境調査を行った結果、以下の知見を得た。(1) 熱貫流率・日射熱取得率を算出したところ、現在の Low-E ペアガラス（アルゴン封入）にはやや劣るものの、普通複層ガラスより優れており、当時としては高性能な窓システムであった。(2) 手摺付バルコニーが日射制御する庇として機能しており、夏期の直達日射の侵入を大きく削減していた。(3) 直達日射が大きい時間帯にキャビティ内の風速が大きくなる傾向にあり、窓システムの熱貫流率が小さくなっていた。(4) 各季節において熱負荷削減に寄与していた。

現在のように高性能なガラス・サッシや空調設備が存在しなかった時代に、計画学的にも温熱環境性能的にも、当時として画期的な

システムを実現していたこと、そして、維持管理および改修によって、竣工後 50 年以上が経過した現在でも当時の性能を発揮できていることを示した。

謝辞

調査にあたり日本財団、東京ビー・エム・シー、松田平田設計（図面提供）をはじめとする皆様に多大なご協力を頂きました。ここに感謝の意を表します。

注釈

- 注1) 高性能窓システムとは、開口部（内部スキン）の外側にもう一層のスキン（外部スキン）を設ける、または開口部（外部スキン）の内側にもう一層のスキン（内部スキン）を設け、スキンの間の中空層内部を自然もしくは機械設備を用いて通気する機構を備えた窓の総称と定義されている¹⁾。
- 注2) 角度 北東面(-147°)、南東面(-30°)ただし南:0°、東:-90°、北:-180°、西:90°
- 注3) 1階・2階は共有スペース、3～8階の基準階は執務室と食堂になっている。基準階では、主な執務スペースが南東面と北面に確保され、西面のスペースにはトイレやロッカー室や機械室等が配置されている。
- 注4) 北西面の事務室以外のコア部（トイレや空調機械室等）においては、外側スキンは他と共通であるが、内側スキンはガラスサッシではなくコンクリート壁となっている。
- 注5) 奥村は「サッシにはアルミと鉄を組み合わせ、FIX窓を多用することでコストの問題を解決した」と述べている²⁾。
- 注6) 現在(2015年)は、自然通風モードの運用は行われていなかった。
- 注7) 奥村は「空気だけでなく、非常時の避難経路の問題も同時に解決できるようにした」と述べている²⁾。
- 注8) 近年のAFWでは、1層ごとに排気ファンが設置され、ブラインドをキャビティ内に設置し、日射がブラインドに当たり発生した熱を上昇気流により除去するシステムであることが多い。
- 注9) 今回の実測を行なったスパンにおいて防火ダンパーが開いている状態を事前に確認した。今回実測したスパン以外の場所では、一部防火ダンパーが閉まっている箇所も見受けられた。防火ダンパーが閉まっていると十分な風速がでず、本来の性能が発揮されないと考えられる。
- 注10) NCRビル原因および改修図面（原因 No. 11）における空調機械設備図から読み取った。
- 注11) Jc-t基準気象データは西・東ゾーンの空調機やベリメータ機器の選定に用いられる冷房設計用データで、太陽位置は8月1日のものである。
- 注12) 参考文献3)において参考文献12)をもとにした竣工直後に行われた環境実測調査の一部が報告されており、その中で「2重サッシュ間の…（中略）…空気の上昇速度は15～60cm/secできわめておそい」と書かれている。
- 注13) 庇による影の影響を加味した直達日射の日照面積率である。隣棟建物の日影の影響はここでは加味していない。
- 注14) 室内の空調には冷暖同時のタイプのビル用マルチエアコンを使用していたため、冷房・暖房の設定は執務者に委ねられていた。そのため本調査時に各階でどのような運転状況であったかは確認できなかった。

参考文献

- 1) 板硝子協会：ビルと複層ガラス 高性能窓システムと平成 25 年改正省エネルギー基準について、2014
- 2) 建築知識「第四回 奥村昭雄×情野文男 科学する建築家奥村昭雄を知る NCR ビル 吉村事務所時代の仕事」[2] p203-210, 2007. 5
- 3) 新建築社：新建築 1963 年 1 月号, pp. 151-173, 1963. 1
- 4) 真鍋恒博：図説 近代から現代の金属製建築部品の変遷（第 1 巻）開口部関連部品、建築技術、1996. 2
- 5) 加藤雅久、真鍋恒博：明治期から昭和初期までのわが国における型板硝子等の変遷、日本建築学会計画系論文集、第 64 巻、第 524 号, pp. 147-154, 1999. 9
- 6) 大井翔太、真鍋恒博：主として我が国における外周壁のガラススクリーン構法の成立過程、日本建築学会大会学術講演梗概集 (E-1), pp. 1123-1124, 2009. 7
- 7) 森哲：板ガラス製造技術発展の系統化調査、国立科学博物館技術の系統化調査報告 第 9 集、独立行政法人 国立科学博物館、2007. 3
- 8) 松本猛：断熱・遮熱ガラス（特集 建材の中のガラス）、New Glass, Vol. 23, No. 24 pp. 3-8, 2008. 12
- 9) 尾山卓司：ドライコーティング技術の過去・現在・未来、旭ガラス研究報告 57, pp. 83-90, 2007
- 10) 板硝子協会：エコガラス よくあるご質問、http://www.ecoglass.jp/s_faq/ (2018 年 6 月 3 日最終アクセス)
- 11) AGC 旭ガラス：高機能複層ガラス用 Low-E ガラスの生産設備増強を決定、<http://www.agc.com/news/detail/19970224.html> (2018 年 6 月 3 日最終アクセス)
- 12) 野村豪：N・C・R ビル外壁の熱負荷の計算（暖房時の場合）：暖房時の場合、日本建築学会。研究発表会梗概集。34(2), A21-A24, 1963. 5
- 13) 郡公子：窓システムの熱性能式と熱特性値, THE BEST Program web site, http://www.ibec.or.jp/best/program/madosystem_netuseino_tokusei.pdf, (2018 年 6 月 3 日最終アクセス)
- 14) 武政祐一、平岡雅哉、加藤正宏：ダブルスキンスファードの熱性能に関する研究 第 1 報—夏期・冬期実測による性能評価、空気調和・衛生工学会論文集、No. 103, 2005. 10
- 15) 菊田弘輝、畑中壮大、羽山広文、絵内正道：積雪寒冷型ダブルスキンの熱負荷低減手法に関する研究、日本建築学会環境系論文集 第 74 巻 第 646 号, pp. 1355-1362, 2009. 12
- 16) OM 研究所：日本の建築デザインと環境技術 その思想とテクニカルアプローチ、《季刊》SOLAR CAT 総集編, p148-150, 2001. 5
- 17) SHASE-G1001-2012: 設計用最大熱負荷計算法改訂小委員会著／空気調和・衛生工学会編・発行。試して学ぶ熱負荷 HASPEE ～新最大熱負荷計算法～, 2012
- 18) Erbs, D.G., S.A. Klein, J.A. Duffie: Estimation of the Diffuse Radiation Fraction for Hourly, Daily and Monthly Average Global Radiation, Solar Energy, Vol. 28, No. 4, pp. 293-302, 1982

[2018 年 6 月 6 日原稿受理 2018 年 10 月 3 日採用決定]